

Reifen - Reifen/Boden-Verhalten

Heinz Dieter Kutzbach und Stefan Böttinger
Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim, Stuttgart

Kurzfassung

Durch größere Reifen bis IF 900/65 R 46 und flexiblere Flanken (Ultraflex Technologie) folgen die Reifenhersteller den Anforderungen moderner Großtraktoren. Die mit IF bzw. VF gekennzeichneten Reifen lassen sehr geringe Reifeninnendrucke zu und haben durch die starke Verformung große Aufstandsflächen mit Vorteilen für Kraftübertragung und Bodenschonung. Hohe verfügbare Rechenleistungen ermöglichen umfangreiche Modellierung des Reifens auch auf nachgiebigen Böden mit Berechnung des Zugkraftverhaltens und der Bodenbeanspruchung.

Schlüsselwörter

Ackerschlepperreifen, Reifenkennlinien, Reifenmodelle, Bodenverdichtung, Fahrkomfort

Tyres - Tyre-Soil-Interaction

Heinz Dieter Kutzbach and Stefan Böttinger
Institute for Agricultural Engineering, University of Hohenheim, Stuttgart

Abstract

Tyre manufacturers meet the increasing demands of high powered farm tractors with the design of big sized farm tractor tyres (IF 900/65 R 46) and more flexible side walls (Ultraflex Technology). These tyres marked with IF or VF need only low inflation pressures and have, due to higher deformation, wider and flatter footprints claiming for increasing tyre performance and reducing soil compaction. High computer performance leads to comprehensive modelling of tyres on soft ground with simulation of traction behaviour and soil stresses.

Keywords

Farm tractor tyres, tyre performance, tyre modelling, soil compaction, ride comfort

Neue Reifenentwicklungen

Steigende Motorleistungen und anwachsende Traktorgewichte erfordern entsprechende Entwicklungen bei den Reifen. Diese Entwicklungen sind gekennzeichnet durch größere Reifendurchmesser, größere Reifenbreiten und Änderungen in den Reifenflanken. Sie haben das Ziel, die höheren Zugkräfte auf den Boden zu übertragen und, durch größere Aufstandsflächen, Spurtiefen und Bodenbeanspruchung in Grenzen zu halten. Mit einem Außendurchmesser von 2,32 m ist der auf der Agritechnica 2013 vorgestellte Michelin AxioBib IF 900/65 R 46 wohl der zur Zeit größte Ackerschlepperreifen, gefolgt von dem TM 1000 High Power von Trelleborg mit 2,30 m. Vorgesehen sind diese Reifen für Traktoren ab 250 kW. Der Michelin-Reifen kann mit einem minimalen Reifeninnendruck von nur 0,8 bar gefahren werden [1].

Geringe Reifeninnendrucke bis herab auf nur 0,4 bar und damit gute Bodenschonung werden durch neue Konstruktionen der Reifenflanken möglich (Ultraflex-Technologie). Gekennzeichnet sind diese Reifen durch die Buchstaben IF für Increased Flexion und VF für Very High Flexion. Bei einem Reifenvergleich von vier Michelin Reifen mit Außendurchmessern von 1,96 m bis 2,16 m, die beiden größeren als IF Reifen, entwickelten die IF Reifen höhere Zugkräfte, hatten eine größere Aufstandsfläche und eine kleinere Spurtiefe [2].

Reifen für Erntemaschinen sind im Außendurchmesser oft begrenzt, sodass die Reifen breiter werden. Auf der Sima 2011 zeigt BKS den Radialreifen AgriMax Teris in der Größe 1050/50 R 32 [3]. Auch Erntemaschinen werden mit Ultraflex-Technologie angeboten und zeigen dann die oben angegebenen Vorteile [4]. Die Kennzeichnung CHO (Cyclic Harvest Operation) bzw. CFO (Cyclic Field Operation) berücksichtigt bei den Tragfähigkeitsangaben, dass die Bunker der Erntemaschinen zyklisch gefüllt und wieder entleert werden und so die volle Last die Reifen nicht dauernd beansprucht.



Bild 1: Ein neues Reifenkonzept, Pneu Trac von Mitas [5] (Bild: Mitas, 2014)

Figure 1: Pneu Trac, a new tyre design by Mitas [5] (Image: Mitas, 2014)

Mitas erhielt auf der EIMA 2014 in Bologna einen Innovationspreis für ein völlig neues Reifenkonzept, den PneuTrac (**Bild 1**) [5]. Er soll die Vorteile des pneumatischen Reifens mit denen des Gummibandlaufwerks verbinden und wurde bisher in der Größe 280/70 R 18 getestet. Untersuchungen an Reifen der Größe 600/65 R 38 wurden begonnen. Durch die Ver-

legung der Reifenflanken in das Reifeninnere wird eine wesentlich größere Aufstandsfläche mit entsprechender Bodenschonung und Zugkraftverbesserung erreicht. Die Seitenstabilität soll dabei erheblich besser sein als die eines Standardreifens. Die Verkaufsfreigabe hängt allerdings von der weiteren Entwicklung des Konzeptes ab.

Die Verwendung von Industriereifen an Ackerschleppern mit hohem Anteil von Straßenfahrten unter Inkaufnahme der schlechten Zugkraftentwicklung und Bodenschonung auf dem Feld könnte zu Kraftstoffeinsparung von etwa 10 – 20 % führen [6].

Reifenkennlinien

Die Reifeneigenschaften sind durch verschiedene Kennlinien beschrieben, die zunächst experimentell bestimmt, dann aber durch mathematische Funktionen oder komplexe Reifenmodelle nachgebildet werden. Die häufig verwendeten Kennlinien sind: Zugkraft/Schlupf, Umfangskraft/Schlupf, Laufwerkwirkungsgrad/Schlupf und Seitenkraft/Schräglauf. Dabei ergeben sich Schlupf bzw. Schräglauf aus den jeweils wirkenden Längs- bzw. Seitenkräften. Weiterhin spielen Aufstandsfläche/ Einfederung/ Radlast sowie Federungs-/ Dämpfungseigenschaften/ Geschwindigkeit eine Rolle.

Über neue Zugkraftmessungen wird in [7 bis 8] unter den besonderen Bedingungen Indiens und Thailands berichtet. Da in den schlammigen Böden wegen des hohen Rollwiderstandes die Zugkraftentwicklung erst bei höheren Schlupfwerten erfolgt, lassen sich Zugkraftkennlinien gut durch ein Produkt zweier e-Funktionen entsprechend den Vorschlägen von Brixius, allerdings mit veränderten Koeffizienten beschreiben, Tabelle 1 in [7].

Die Kennzeichnung der für die Zugkraftentwicklung wichtigen Bodeneigenschaften kann durch eine dimensionslose Kennzahl, die Mobility Nummer $MN = CI \cdot b \cdot d / W$, erfolgen. Diese erfasst die Bodenbedingungen durch den Cone Index CI (Penetrometer-Eindringwiderstand), den Reifen durch b sowie d und die Radlast W. Sie wird entsprechend den Versuchsergebnissen häufig durch einen Faktor k erweitert. [9] enthält eine umfassende Zusammenstellung der Mobility Nummern und schlägt für einen kleinen Reifen den im Grunde einfachen Faktor $k = \sqrt{(h - \delta) / d}$ vor.

Oft lassen sich die Zugkraft/Schlupf-Kennlinien durch eine einfache e-Funktion der Art $\kappa = a - b \cdot e^{-c\sigma}$ beschreiben, die allerdings den häufigen Abfall der Zugkraftbeiwerte bei höheren Schlupfwerten nicht widerspiegelt. Dieser Abfall (s. **Bild 3**) kann durch die Ergänzung obiger Gleichung durch den Summanden $-d\sigma$ erfasst werden [10]. Die für Pkw-/Lkw-Reifen bei Straßenfahrt weit verbreitete Magic Formula von Pacejka kann nach [11] auch für Reifen auf kohäsivem Boden zur Darstellung der Zugkraftkennlinie angewendet werden. Am Beispiel von sechs Michelin XL Reifen mit Blockprofil werden die Koeffizienten der Magic Formula in Abhängigkeit von einer geänderten Mobility Nummer $MN = CI \cdot b^{0,9} \cdot d^{0,65} \cdot \delta^{0,45} / W$ ermittelt. Neuere Messeinrichtungen zur Messung der Zugkraft/Schlupf-Kennlinien sind in [7; 12 bis 15] beschrieben, wobei die in [15] verwendete Führung der Einzelradmesseinrichtung durch den Ausleger eines Baggers eine sehr originelle Idee ist.

Die in [16] erläuterte Arbeit hat das Ziel, Seitenkraft/Schräglaufwinkel-Kennlinien für große Reifen aus Fahrversuchen ohne den Einsatz von aufwändigen Einzelradmesseinrichtungen zu bestimmen. Die Seitenkräfte werden mit modularen Messfelgen gemessen, die momentanen Schräglaufwinkel aus Radstellung und Fahrkurs ermittelt. Bei Fahrgeschwindigkeiten um 50 km/h und geringen Änderungsgeschwindigkeiten der Schräglaufwinkel von 1 °/s konnte die Kennlinie für Schräglaufwinkel von -8° bis 4° erstellt werden. Der schon früher von Heine, Barreilmeyer und Schlotter experimentell gezeigte starke Einfluss von Schlupf/Schräglauf-Änderungsgeschwindigkeit auf die jeweiligen Kennlinien wird in [17] anhand einer Modellrechnung deutlich unterstrichen. Der Einfluss von Radlast und Reifeninnendruck auf Zugleistung und Kraftstoffverbrauch wird in [18] mit einem semi-empirischen Schlepper/Reifen/Boden-Modell und mit Zugversuchen eines Schleppers mit 65 kW ermittelt. Dabei erweist sich geringer Reifeninnendruck positiv für bessere Triebkraftbeiwerte; höhere Radlasten erzeugten zwar höhere Gesamtzugkraft und geringeren Kraftstoffverbrauch, aber der Triebkraftbeiwert wurde geringer. Die Einfederung großer Ackerschlepperreifen wird außer von der Radlast, vom Reifeninnendruck, der Bodenfestigkeit und vom Reifenaufbau beeinflusst. Durch gleichzeitige Messung von Einfederung und Reifeninnendruck [19] können im Zusammenwirken mit einer Reifendruckregelanlage unzulässige Reifenverformungen vermieden und der Reifen besser ausgelastet werden. Darüber hinaus wäre bei Erntemaschinen eine kontinuierliche Erfassung der Radlast und damit des Bunkerinhalts möglich. Die Bestimmung von Latschgröße und Einfederung kann auch über die fotografische Erfassung der Reifeninnenkontur mit Stereokameras im Reifen erfolgen [20]. Am Beispiel eines kleinen 10“ Reifens berichtet [21] über Versuche, mit einer kostengünstigen Piezofolie zwischen Schlauch und Mantel Spannungen und Verformungen zu ermitteln.

Reifenmodelle

Reifenmodelle sind zur vorausschauenden fahrdynamischen Untersuchung von Fahrzeugen mit Mehrkörpersimulationen notwendig. Die Reifenmodelle sollen das Reifenverhalten – Kennlinien, Federungs- und Dämpfungsverhalten – so genau wie möglich nachbilden, ohne dass die Zeit für die Fahrzeugsimulation untragbar lang wird. Finite-Elemente-Modelle der Reifen scheiden deswegen zurzeit noch aus, obwohl steigende Rechenleistungen umfangreichere Reifenmodelle ermöglichen. Eingesetzt werden deswegen semiempirische Reifenmodelle, wie beispielsweise F-Tire oder CD-Tire für Pkw- und Lkw- Reifen, deren viele Parameter oft mit erheblichem Aufwand bestimmt werden müssen.

Für großvolumige Ackerschlepperreifen wurde das nichtlineare Hohenheimer Reifenmodell von einem dreidimensionalen Einpunktkontakt-Modell zu einem dreidimensionalen Speichenmodell weiterentwickelt [22 bis 24]. Mit diesem Speichenmodell kann nun die Hindernisüberfahrt besser nachgebildet und in weiteren Schritten die Fahrt auf nachgiebigem Boden simuliert werden. Auch zu Komfort-Analysen kann dieses Reifenmodell eingesetzt werden. Das Modell besteht aus einer Vielzahl von nichtlinearen Voigt-Kelvin-Elementen, den Speichen, die sich in der Aufstandsfläche alle 2° wiederholen und einen Stick-Slip-Effekt beinhalten (**Bild 2**). Die Reifenunrundheit wird durch die Speichenlänge berücksichtigt. Die Speichen sind untereinander zur Darstellung der Längssteifigkeit mit Federelementen vernetzt und insgesamt mit einem Voigt-Kelvin-Element an die Nabe gekoppelt. Die Speichen enthal-

ten auch für die Abstützung der Seitenkräfte Voigt-Kelvin-Elemente und nicht wie frühere Reifenmodelle Maxwell-Elemente. Die stetige seitliche Bewegung des Rades unter Seitenkräften wird durch das Modell selbst erzeugt. Die Parametrisierung kann auf den Hohenheimer Prüfständen (Flachbandprüfstand, Einzelradmesseinrichtung) erfolgen.

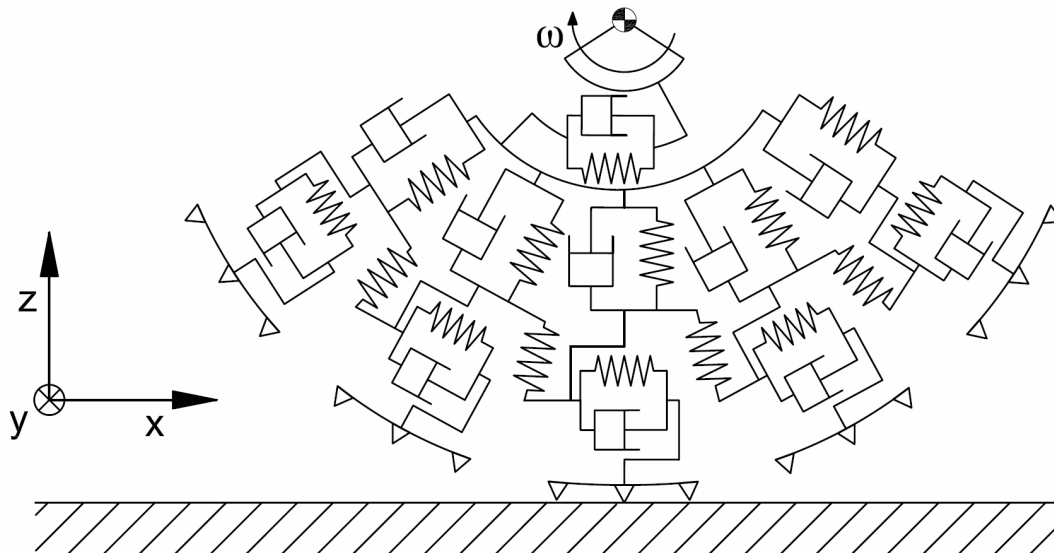


Bild 2: Modellstruktur des Hohenheimer Speichenmodells für Reifen [22]

Figure 2: Model structure of the Hohenheim brush type Tyre Model [22]

Laborprüfstände zur Parametrisierung eines SUV-Reifens der Größe 235/85 R 16 LTX für ein F-Tire-Modell sind in [25] beschrieben: hydraulischer Belastungsprüfstand des ruhenden Reifens für Federkennlinie, Aufstandsfläche und Reibung. Das Modellverhalten kann mit einer gezogenen Einzelradmesseinrichtung überprüft werden. Am Beispiel eines Michelin-Reifens 16.00 R 20 XZL wurden diese Prüfstände ebenfalls zur Parametrisierung herangezogen [26] und das Verhalten verschiedener Modelle auf verschiedenen festen Böden und Hindernissen untersucht. F-Tire beschrieb dabei das tatsächliche Reifenverhalten am besten [27]. Erneute Hinweise zur Bedeutung der kinetischen und kinematischen Rollradien in der Modellentwicklung, vor allem bei unebenen Fahrbahnen werden in [28] gegeben. Die Geschwindigkeit der Latschfläche wird über Kameras mit Bildauswertung bestimmt; sie entspricht weitgehend der über GPS ermittelten Fahrzeuggeschwindigkeit.

Die Modellierung des Reifens im Gelände erfordert zusätzlich die Modellierung des Bodens und der gegenseitigen Beeinflussung von Reifen und Boden. Die theoretischen Grundlagen zur Bodenmodellierung sind in [29] sehr gut zusammengefasst und die Reifenkennlinien für starre und flexible Räder am Beispiel eines SUV Reifens 265/70 R 17 entwickelt. Für die Reifenverformung im Latsch wird nicht auf ein größeres starres Ersatzrad oder einen parabelförmigen Verlauf zurückgegriffen, sondern eine neue dreiteilige Gleichung vorgeschlagen. Für die Daten eines größeren SUV wird mit diesem Modell der beste Gesamtwirkungsgrad des Laufwerks und die geringste Schlupfdifferenz an den Achsen für 55 bis 65 % des Gesamtmoments an der Hinterachse ermittelt [30].

Das Hybrid Soft Soil Tire Model (HSSTM) der Virginia Tech, Blacksburg, [31] ist das zurzeit wohl am weitesten entwickelte und validierte Reifenmodell für nachgiebigen Boden. [31] enthält 16 weitere Literaturstellen der Virginia Tech aus den Jahren 2008 bis 2014 zur Entwicklung von Reifenmodellen für den Offroad Einsatz. Das HSSTM ist als Speichermodell aus Voigt-Kelvin-Elementen aufgebaut und ausführlich mathematisch formuliert. Die Rechenzeit kann durch optimierte Rechenroutinen kurz genug für Mehrkörper-Fahrzeug-Simulationen gehalten werden. Die Parameterbestimmung für einen 225/60 R 16 97S Michelin Reifen erfolgt in mehreren Schritten durch Standard-Messverfahren, Modalanalyse und FEM Modellierung sowie Überprüfung in einer Bodenrinne. Die Modellergebnisse zur Spurtiefe, Längskraft, Seitenkraft und Lenkmoment stimmen bei geringen systematischen Abweichungen gut mit den Versuchsergebnissen überein. Der Multipasseffekt ist berücksichtigt und in [31] visualisiert. Die mit dem Modell errechneten Zugkraftbeiwerte für drei Böden sind in **Bild 3** bei vier Schlupfwerten angetragen. Sehr deutlich wird der unterschiedliche Verlauf der Zugkraftbeiwerte mit teils ausgeprägten Maxima.

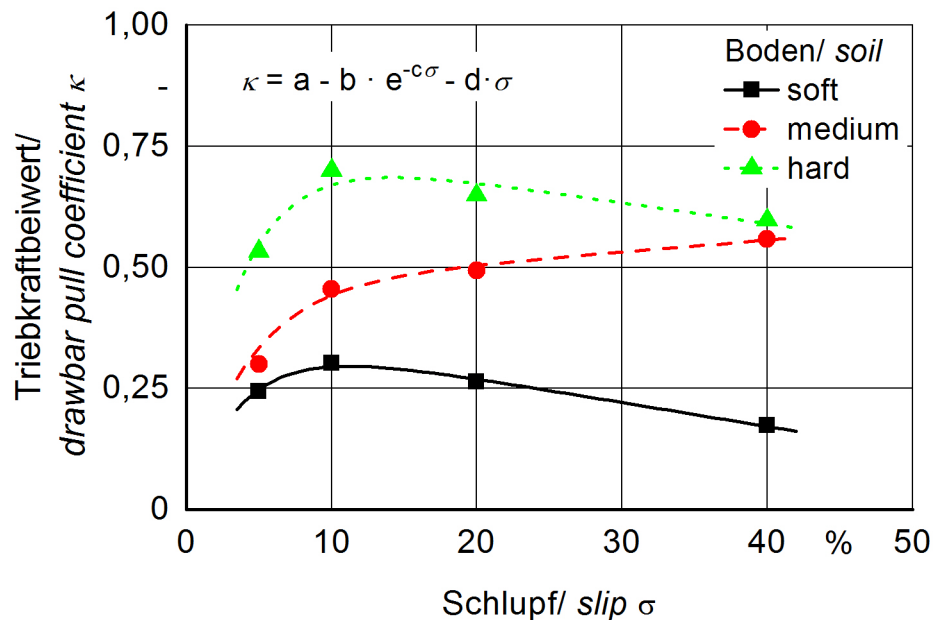


Bild 3: Berechnete Zugkraftkoeffizienten eines profillosen Reifens 225/60 R 16, geändert nach [31]

Figure 3: Simulated drawbar pull coefficients of a buffed tire 225/60 R 16, modified after [31]

Bodenverdichtungen

Durch das Befahren landwirtschaftlicher Nutzflächen bilden sich Spuren, die unter ungünstigen Last- und Bodenverhältnissen zu Schadverdichtungen führen können. Diese führen zu vermindertem Pflanzenwachstum, Staunässe und Erosion, sind also durch angepasste Radlasten, Bereifungen, niedrige Reifeninnendrucke und das Befahren tragfähiger Böden zu vermeiden. [32] zeigt beispielsweise die Wheel Load Carrying Capacity im Jahresverlauf, wobei im gezeigten Beispiel von April bis Oktober gute Tragfähigkeit vorlag. Mit dem Rechenverfahren TASC (Tyres/Tracks And Soil Compaction) soll dem Landwirt die Entschei-

derung der Befahrbarkeit erleichtert werden. In [33] werden die verschiedenen Module von TASC vorgestellt.

Zum Vergleich verschiedener Laufwerke werden häufig die Spannungen im Boden (Druckzwiebeln) oder auch die Druckverteilung im Latsch herangezogen [15; 34 bis 38]. Diese mit verschiedenen Fahrzeugen auf verschiedenen Böden durchgeführten Untersuchungen zeigten folgende Ergebnisse: Im Vergleich mit Einfachbereifung zeigte das Challenger Bandlaufwerk den geringsten Druck von 0,27 bar in einer Tiefe von 30 cm; es folgten AxioBib IF 650/85 R 38 ($p_i = 0,7$ bar) an zweiter Stelle mit einem Bodendruck von 0,36 bar [34]. Zwillingsbereifung verursachte nach Messungen von [35] geringere Bodenspannungen als das Quadtrac-Laufwerk, wobei besonders unter den Tragrollen Spitzen auftraten. Dies wurde bestätigt bei einem Vergleich eines Case IH Steiger 500 mit 710/70 R 42 Zwillingsbereifung (Standard und IF) mit einem Case IH Quadtrac-Laufwerk [36] und an einem einfach bereiften Mähdrescher CR9070 [37]. In [38] wurden vier Anhänger-Reifen für die Zuckerrohrernte hinsichtlich Aufstandsfläche und Druckverteilung in 10 bis 70 cm Tiefe untersucht. Die Reifen mit Blockstollen und mit Längsrillen waren bodenschonender.

Die experimentellen Untersuchungen [33 bis 38] haben auch die positive Wirkung eines geringen Reifeninnendrucks gezeigt. Die Absenkung des Reifeninnendrucks entsprechend der tatsächlichen Radlast ist bedeutend, sodass bei Hang- bzw. Pflugarbeiten eine Einzelrad-Reifendruckregelanlage von Vorteil wäre [39]. Überraschend hat beim Pflügen das Landrad aufgrund der vom Pflug übertragenen Kräfte höhere Radlasten [40].

Da das Pflanzenwachstum durch die Bodendichte – nicht durch die Bodenspannung – beeinflusst wird und der Zusammenhang zwischen beiden Größen nicht eindeutig ist, berechnet [41] mit FEM direkt die Dichteverteilung unter dem Rad und den Einfluss von beispielsweise Reifeninnendruck und Fahrgeschwindigkeit auf die Dichte. Einen sehr überlegenswerten Weg zur Auswahl bodenschonender Reifen beschreibt nach intensiven Forschungsarbeiten der abschließende Beitrag [42]. Die Autoren schlagen vor, die Reifen in Reifentabellen zusätzlich mit einer Kennzahl, dem CC- bzw. LCC-Index zu kennzeichnen (Low Compaction Capacity). Diese Kennzahl beschreibt die Verdichtungswirkung der Reifen. Die Berechnung des CC-Index beruht auf gemessenen Zusammenhängen zwischen Druckbelastung des Bodens und der dadurch verursachten Bodendichte. Als Bezugsgröße für eine optimale Bodendichte eines Lehm Bodens wurden Werte von 1420 kg/m³ (CC) bzw. 1290 kg/m³ (LCC) gewählt.

Komfort

Bei den ungefederten landwirtschaftlichen Fahrzeugen übernehmen die Reifen auch Federungs- und Dämpfungsaufgaben. [43] zeigt den erheblichen Einfluss der Reifenunrundheit auf den Comfort Index, der bei einer Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h bereits unkomfortable Werte von 1,47 m/s² annimmt, insbesondere wegen einer Resonanz der Vorderräder. Mit einem einfachen Mehrkörpermodell untersucht [44] den Einfluss der Feder-Dämpfungskennwerte von zwei Reifen bei Fahrt auf zwei nachgiebigen Böden auf die Sitzbeschleunigung. Der Boden wird durch eine kontinuierliche Schicht von Federn

modelliert, in Längsrichtung wird die Schubspannung auf einen maximalen Wert begrenzt. Validiert wird das Modell auf einem 4-Stempel-Prüfstand. Die Fahrt auf nachgiebigem Boden verringert die Sitzbeschleunigung um 15 - 20 %. Zwei interessante Beiträge [45; 46] beschreiben Sicherheitsmaßnahmen an gefederten Fahrzeugen am Beispiel eines Landrovers durch einen aktiven Stabilisator zur Verbesserung des Fahrzeugrollverhaltens und die automatische Verringerung der Fahrgeschwindigkeit vor engen Kurven entsprechend der über GPS bekannten Route zur Vermeidung von kritischen Fahrsituationen.

Fachtagungen

Die Gründung der ISTVS (International Society for Terrain Vehicle Systems) wurde anlässlich einer ersten internationalen Tagung 1961 in Turin beschlossen. Anlässlich der 17. Internationalen ISTVS Konferenz 2011 in Blacksburg an der Virginia Tech wurde das 50-jährige Bestehen der ISTVS gefeiert. Dr. Sally Shoop, 1. Vizepräsidentin, und Dr. Peter Kiss, 2. Vizepräsident, haben zu diesem Anlass ein sehr gelungenes Büchlein herausgegeben [47]. Es enthält u.a. die Liste der ISTVS Konferenzen, Ehrungen, persönliche Beiträge einzelner Mitglieder, viele Fotos und eine Beschreibung amerikanischer Forschungseinrichtungen mit ISTVS Bezug. Die Tagung wurde unter dem Vorsitz von Professorin Corina Sandu organisiert. Es folgten die nationalen Tagungen 2012 in Pretoria unter Vorsitz von Professor Schalk Els, 2013 in Tampa und 2014 die 18. Internationale Konferenz in Seoul. Die Tagungsbände [48 bis 50] sind über die ISTVS zu beziehen.

Literatur

- [1] -, -: Agritechnica-Neuheiten. Profi 25 (2013) H. 12, S. 174
- [2] -, -: Darf's eine Nummer größer sein. dlz-agrarmagazin 62 (2011) Sonderheft Traktoren, S. 8-13
- [3] -, -: Premieren in Paris. dlz-agrarmagazin 62 (2011) H. 4, S. 84
- [4] -, -: Mehr Tragkraft durch Technologie. dlz-agrarmagazin 63 (2012) Sonderheft Traktoren, S. 8-14
- [5] -, -: Innovationspreis für Mitas PneuTrac auf der EIMA. Pressemitteilung Mitas 29.10.2014, www.mitas-tyres.com
- [6] Reckleben, Y.; Schäfer, N. und Weißbach, M.: Steigerung der Effizienz bei Straßen-transporten mit unterschiedlichen Reifentypen für Traktoren. Landtechnik 68 (2013) H. 3, S. 196-201
- [7] Gholkar, M.D.; Soni, P.; Salokhe., V.M. und Keen, A.: Modelling the tractive performance of a four wheel tractor operating in rear wheel drive in soft clay wetland paddy. Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea (2014)
- [8] Ferdous, J.; Soni, P.; Gholkar, M.D. und Keen, A.: The rolling resistance and tractive performance of a small agricultural tractor with different surface and moisture conditions on Bangkok clay soil. Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea (2014)
- [9] Hegazy, S. und Sandu, C.: Experimental investigation of vehicle mobility using a novel wheel mobility number. Journal of Terramechanics 50 (2013), S. 303-310
- [10] Schreiber, M. und Kutzbach, H.D.: A traction prediction model for agricultural tyres. Proceedings of the 10th European Conference of the ISTVS, Budapest, Ungarn (2006)
- [11] Maclaurin, B.: Using a modified version of the Magic Formula to describe the traction/slip relationships of tyres in soft cohesive soils. Journal of Terramechanics 52 (2014), S. 1-7
- [12] Lee, J.H. und Gard, K.: Vehicle-soil interaction: Testing, modeling, calibration and validation. Journal of Terramechanics 52 (2014), S. 9-21
- [13] Bhoopalam, A.K. und Sandu, C.: Review of the state of the art in experimental studies and mathematical modeling of tire performance on ice. Journal of Terramechanics 53 (2014), S. 19-35
- [14] Goli, H.; Minaee, S.; Jafari, A.; Keyhani, A.; Borghaee, A. und Hajiahmad, A.: An instrumented drive axle to measure tire tractive performance. Journal of Terramechanics 49 (2012), S. 309-314
- [15] Li, H. und Schindler, C.: Analysis of soil compaction and tire mobility with finite element method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics (2013), S. 227-275

- [16] Schulze Zumkley, H. und Böttinger, S.: Identifikation der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinie aus Fahrversuchen mit einem Ackerschlepper. Landtechnik 65 (2010) H. 6, S. 426-428
- [17] Ferhadbegović, B.; Brinkmann, C.; Böttinger, S. und Kutzbach, H.D.: Einfluss des Reifeninnendrucks auf das laterale Übertragungsverhalten von landwirtschaftlichen Reifen. Landtechnik 65 (2010) H. 3, S. 174-177
- [18] Battiato, A. und Diserens, E.: Influence of tyre inflation pressure and wheel load on the traction performance of a 65 kW MFWD tractor on a cohesive soil. Journal of Agricultural Science 5 (2013) H. 8, S. 197-215
- [19] Nolting, K.; Brunotte, J.; Sommer, C. und Ortmeier, B.: Reifeneinfederung kontra Radlast. Landtechnik 66 (2011) H. 3, S. 194-197
- [20] Guthrie, A.G.M; Botha, T.R. und Els, P.S.: 3D computer vision contact patch measurements inside off-road vehicle tyres. Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea (2014)
- [21] Armstrong, E.G.; Sandu, C. und Taheri, S.: A study on using piezoelectric sensors in a wheeled robot tire for surface characterization. Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea (2014)
- [22] Witzel, P.; Böttinger, S. und Kutzbach, H.D.: The advanced Hohenheim Tyre Model for the simulation of obstacle passages. Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea (2014)
- [23] Witzel, P. und Böttinger, S.: Upgrading of the Hohenheim Tyre Model to a radial approach for the simulation of obstacle passages. VDI-MEG Tagung Landtechnik AgEng 2011, Hannover 11.-12.11.2011. VDI-Berichte Nr. 2124. Düsseldorf: VDI Verlag 2011, S. 431-437
- [24] Witzel, P. und Böttinger, S.: Advancement and validation of the Hohenheim Tyre Model. VDI-MEG Tagung Landtechnik AgEng 2013, Hannover 08.-09.11.2013. VDI-Berichte Nr. 2193. Düsseldorf: VDI Verlag 2013, S. 73-81
- [25] Bosch, H.R.B.; Hamersma, H.A. und Els, P.S.: FTire parameterisation of an SUV tyre. Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea (2014)
- [26] Stallmann, M.J.; Els, P.S. und Bekker, C.M: Parameterization and modelling of large off-road tyres for ride analyses: Part 1 – Obtaining parameterization data. Journal of Terramechanics 55 (2014), S. 73-84
- [27] Stallmann, M.J. und Els, P.S.: Parameterization and modelling of large off-road tyres for ride analyses: Part 2 –Parameterization and validation of tyre models. Journal of Terramechanics 55 (2014), S. 85-94
- [28] Hamersma, H.A.; Botha, T.R. und Els, P. S.: Kinetic vs. kinematic roll radius on rough roads. Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea (2014)
- [29] Senatore, C. und Sandu, C.: Off-road tire modeling and the multi-pass effect for vehicle dynamics simulation. Journal of Terramechanics 48 (2011), S. 265-276
- [30] Senatore, C. und Sandu, C.: Torque distribution influence on tractive efficiency and mobility of off-road wheeled vehicles. Journal of Terramechanics 48 (2011), S. 372-383

- [31] Taheri, Sh.; Sandu, C. und Taheri, S.: Development and implementation of a Hybrid Soft Soil Tire Model (HSSTM). Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea (2014)
- [32] Keller, T.; Gut, S.; Weisskopf, P.; Chervet, A.; Sturny, W.G.; Stettler, M.; Lamandé, M. und Schjønning, P.: An approach for calculating the seasonal dynamics in wheel load carrying capacity. Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering, Zürich, 06.-10.07.2014
- [33] Diserens, E.; Battiato, A. und Sartori, L.: Soil compaction, soil shearing and fuel consumption: TASC V3.0 – A practical tool for decision-making in farming. Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering, Zürich, 06.-10.07.2014
- [34] Smith, E.K.; Misiewicz, P.A.; Chaney, K.; White, D.R. und Godwin, R.J.: Effect of tracks and tyres on soil physical properties in a sandy loam soil. ASABE Paper Number: 141912659
- [35] Arvidsson, J. und Keller, T.: Soil stresses under tracks and tyres – measurements and model development. Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering, Zürich, 06.-10.07.2014
- [36] Rethmel, B.R.: Comparison of subsurface pressure created by radial agricultural tires and agricultural tracks (4 wheel drive tractors & grain carts). ASABE Paper Number: 141896712
- [37] -, -: Raupe oder Reifen? Agrartechnik 92 (2013) H. 11, S. 182-188
- [38] Rodríguez, L.A.; Valencia, J.J. und Urbano, J.A.: Soil compaction and tires for harvesting and transporting sugarcane. Journal of Terramechanics 49 (2012), S. 183-189
- [39] Theißen, G.: Den Reifendruck auch am Hang regeln. Profi 26 (2014) H. 10, S. 74-77
- [40] Brunotte, J.; Nolting, K.; Fröba, N. und Ortmeier, B.: Bodenschutz beim Pflügen: Wie hoch ist die Radlast am Furchenrad? Landtechnik 67 (2012) H. 4, S. 265-269
- [41] Xia, K.: Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. Journal of Terramechanics 48 (2011), S. 113-123
- [42] Grečenko, A. und Prikner, P.: Tire rating based on soil compaction capacity. Journal of Terramechanics 52 (2014), S. 77-92
- [43] Cutini, M.; Romano, E. und Bisaglia, C.: Assessment of the influence of the eccentricity of tires on the whole-body vibration of tractor drivers during transport on asphalt roads. Journal of Terramechanics 49 (2012), S. 197-206
- [44] Melzi, S.; Negrini, S. und Sabbioni, E.: Numerical analysis of the effect of tire characteristics, soil response and suspensions tuning on the comfort of an agricultural vehicle. Journal of Terramechanics 55 (2014), S. 17-27
- [45] Cronjé, P.H. und Els, P.S.: Improving off-road vehicle handling using an active anti-roll bar. Journal of Terramechanics 47 (2010), S. 179-189
- [46] Hamersma, H.A. und Els, P.S.: Longitudinal vehicle dynamics control for improved vehicle safety. Journal of Terramechanics 54 (2014), S. 19-36

- [47] Kiss, P. und Shoop, S.: Terramechanics Around the World. International Society for Terrain Vehicle Systems, 2012
- [48] Proceedings of the 17th Int. Conference of the ISTVS, Blacksburg, VA, USA, 2011
- [49] Proceedings of the 12th European ISTVS Conference, Pretoria, Südafrika, 2012
- [50] Proceedings of the 18th Int. Conference of the ISTVS, Seoul, Südkorea, 2014

Bibliografische Angaben / Bibliographic Information

Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation

Kutzbach, Heinz Dieter; Böttinger Stefan: Reifen - Reifen/Boden-Verhalten. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2014. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2015. S. 1-12

Zitierfähige URL / Citable URL

<http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00055050>

Link zum Beitrag / Link to Article

<http://www.jahrbuch-agrartechnik.de/index.php/artikelansicht/items/183.html>